СИСТЕМА АКТИВНОЙ ДИАГНОСТИКИ ПРОЦЕССА СВАРКИ

А.М. Апасов

Юргинский технологический институт Томского политехнического университета
E-mail: adm@ud.tpu.edu.ru

На основе впервые проведенной раздельной регистрации параметров сигналов акустической эмиссии от источников зарождающихся трещин и непроваров разработаны метод и устройство непрерывного контроля и предотвращения данных дефектов при сварке в реальном масштабе времени.

1. Разработка метода и системы активной диагностики

В основу материалов данной статьи были положены результаты проведенных теоретических и экспериментальных исследований процессов трещинообразования при сварке [1–6], возникновения непровара [7], определения координат дефектов [8], структуры металла сварного шва [9], а также устранения трещиноподобных дефектов [10–12], которые были взяты в качестве исходных данных и позволили разработать метод контроля сварки цилиндрических изделий [13].

Метод основан на приеме и разделении суммарного сигнала акустической эмиссии (АЭ), несущего информацию о дефектах, на сигналы, характеризующие источники зарождающихся непроваров и трещин. Образовавшиеся в процессе сварки зоны непроваров через систему обратной связи дополнительно проплавляют, а источники уже зарождающейся трещины в процессе сварки уничтожают мощным импульсом излучения оптического квантового генератора (ОКГ) [13].

Основное требование, предъявляемое к системе активной диагностики, должно быть таким, чтобы было обеспечено согласование входа данного устройства с выходом измерителя акустических сигналов, к которому данное устройство подключается. Выходные сигналы измерителя акустических сигналов, в частности ИАС-4, соответствуют ТТЛ-элементам с нагрузочной способностью 4.

В соответствии с этим требованием была разработана система, реализующая данный метод контроля, функциональная схема которой приведена на рис. 1–4.

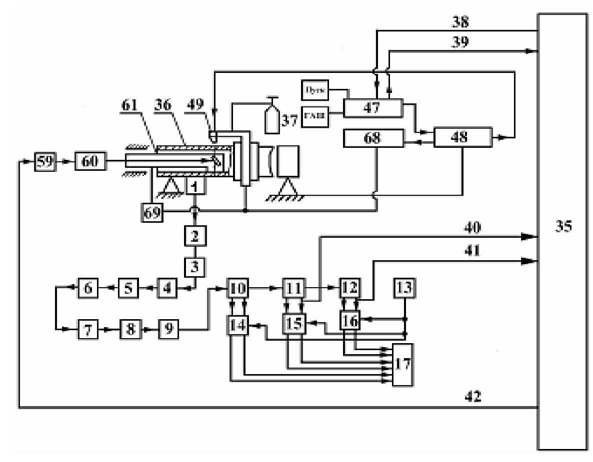


Рис. 1. *Функциональная схема сварочного комплекса и системы активного воздействия на зарождающиеся дефекты в процессе сварки*

На рис. 1 представлена общая функциональная схема системы активного воздействия на зарождающиеся дефекты, состоящая из:

1. Системы приема и обработки информации (блоки 1–17).
2. Блока обратной связи (БОС) 35.
3. Сварочного комплекса (блоки 37, 47, 48, 49, 50, 68, 69).
4. Контролируемого трубопровода 36.
5. Системы активного воздействия на источники зарождающихся трещин (блоки 59, 60, 61).

На рис. 2 изображена функциональная схема блока обработки и формирования импульсов (блоки 10, 11 и 12).

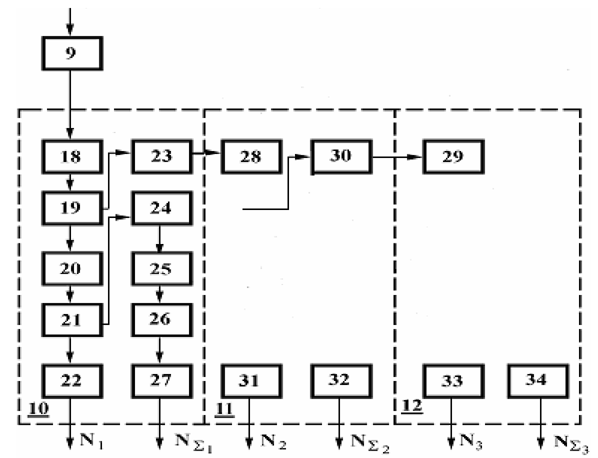


Рис. 2. *Функциональная схема блока обработки и формирования импульсов*

На рис. 3 представлена функциональная схема блока обратной связи 35.

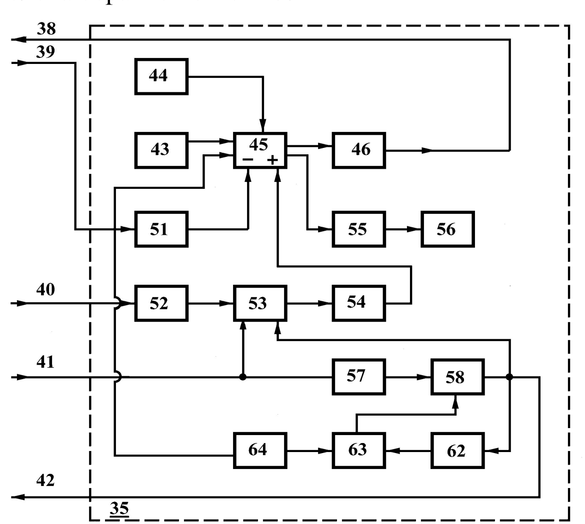


Рис. 3. *Функциональная схема блока обратной связи*

На рис. 4 изображена функциональная схема активного воздействия на источники зарождающихся горячих трещин в процессе сварки, включающая в себя оптический квантовый генератор 60, оптическую систему 61 (рис. 1), контролируемый трубопровод 36.

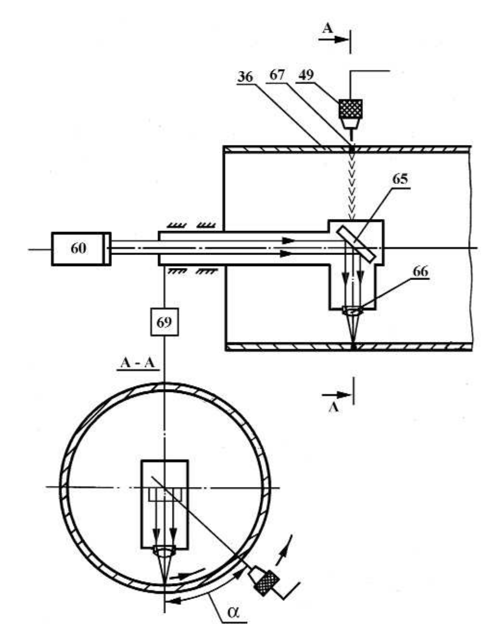


Рис. 4. *Функциональная схема активного воздействия на источники зарождающихся горячих трещин в процессе сварки трубопроводов*

2. Описание работы системы активной диагностики

Система активной диагностики работает следующим образом. Предварительно в зону сварки подается защитный газ из баллона 37 (рис. 1).

После запуска сварочного комплекса путем нажатия кнопки “ПУСК” на пульте управления 47, акустическая волна, возникающая в процессе сварки воспринимается электроакустическим пьезопреобразователем 1, закрепленным на свариваемой трубе 36 и преобразуется в электрический сигнал, который после предварительного усиления в предусилителе 2 подается на входной аттенюатор 3 с дискретным шагом дискриминации уровня сигнала.

С аттенюатора 3 сигнал через эмиттерный повторитель 4 поступает на фильтр верхних частот (ФВЧ) 5, служащий для устранения низкочастотных помех производственного происхождения и усиливается в усилителе 6, охваченном отрицательной обратной связью. Далее сигнал подаётся на фильтр нижних частот (ФНЧ) 7 для ограничения диапазона со стороны высоких частот. Последнее объясняется сильным затуханием акустических колебаний высокой частоты в конструкционных материалах и, следовательно, принципиальными трудностями выявления таких колебаний на практически приемлемых для реальных целей расстояний от источника АЭ. С выхода ФНЧ 7 сигнал поступает на усилитель 8, а затем на эмиттерный повторитель 9. После усиления сигнал поступает с выхода эмиттерного повторителя 9 на три канала блока обработки и формирования 10, 11 и 12 (рис. 2), которые позволяют осуществить амплитудную дискриминацию сигнала АЭ по трем уровням (порогам) 18, 28 и 29.

Дискриминация сигнала АЭ по амплитуде на входе каждого канала при необходимости может быть осуществлена входным аттенюатором 3. При этом пороговые устройства 18, 28 и 29 всех каналов через развязывающие цепи (эмиттерные повторители) 23, 30 включены последовательно с целью динамического расширения диапазона при измерениях АЭ. Далее в канале блока обработки и формирования сигнал усиливается усилителем 19, проходит внутреннее пороговое устройство 20, ограничивающее сигнал снизу с целью отсечки шумов входных цепей и усилителей, а затем поступает на формирование суммарной АЭ 21 и одновременно через эмиттерный повторитель 24, усилитель 25 на формирователи числа импульсов АЭ 26. После формирователей 21 и 26 суммарная АЭ и число импульсов АЭ подается через ключевые каскады 22 и 27, 31–34 на три блока счёта 14, 15 и 16 (рис. 1). Каждый блок счёта работает в паре с одним каналом обработки и формирования, который осуществляет одновременно подсчёт активности АЭ, а также число импульсов АЭ с преобразованием результатов в аналоговую форму, удобную для записи на самописце 17. Управление работой блоков счёта 14, 15 и 16 осуществляется импульсами, поступающими с формирователя временных интервалов 13.

Перед началом сварки необходимо подготовить к запуску БОС 35 (рис. 3). Для этого с помощью устройства задания начальной величины сварочного тока 43 устанавливают значение начального тока сварки в десятичной системе. Посредством устройства записи 44 величина тока записывается из устройства задания начальной величины сварочного тока 43 в реверсивный счетчик 45. Сигнал на выходе реверсивного счетчика 45 также выражен в двоично-десятичном коде.

Далее сигнал с выхода реверсивного счетчика 45 поступает на вход цифроаналогового преобразователя (ЦАП) 46. В ЦАПе происходит преобразование двоично-десятичного кода с выхода реверсивного счётчика 45 в аналоговый сигнал, который по линии 38 (рис. 1) поступает на пульт управления 47 и устанавливает значение начального тока сварки в сварочном выпрямителе 48, который поступает на сварочную горелку 49, закреплённую на сварочной головке 50.

В случае превышения величины тока сварки в выпрямителе 48 более допустимой, ток через пульт управления 47 по линии 39 поступает на вход компаратора 51 (рис. 3), на выходе которого формируется импульс, поступающий на вычитающий вход реверсивного счётчика 45.

В результате происходит вычитание из установившегося значения сварочного тока и, следовательно, на выходе ЦАП 46 происходит автоматическое уменьшение тока до допустимой величины.

Информация, поступающая с выхода каналов 11 и 12 блока обработки и формирования на вход каналов БОС 35 (рис. 1), может быть выбрана в виде суммарной АЭ или числа импульсов АЭ (рис. 2). Количество каналов выбирают исходя из установленной возможности раздельной регистрации дефектов (например, непроваров, горячих трещин и т.д.), а ширину каждого канала – в соответствии с динамическим диапазоном амплитуд сигналов от анализируемых процессов, т.к. каждый канал характеризует степень потенциальной опасности дефектов.

Если сигнал, поступающий с выхода эмиттерного повторителя 9 на вход первого канала обработки и формирования 10, не превышает пороговой (эталонной) величины, устанавливаемой пороговым устройством 28 (рис. 2) на входе второго канала блока обработки и формирования 11, то сигнал претерпевает дальнейшую обработку и формирование, поступает на блок счета 14 и далее выводится на самопишущий потенциометр 17, а сам процесс считается бездефектным. Пороги срабатывания от сигналов АЭ, несущих информацию от возникающих непроваров и источников зарождающихся горячих трещин в процессе сварки, определяются из предварительных экспериментов.

При отклонении процесса сварки от технологического режима и возникновении ситуации «НЕПРОВАР» сигнал с выхода усилителя 19 первого канала блока обработки и формирования 10 через эмиттерный повторитель 23 открывает пороговое устройство 28 второго канала обработки и формирования 11 (рис. 2). При этом пороговое устройство 29 третьего канала блока обработки и формирования 12, предназначенного для регистрации сигналов от источников зарождающейся трещины, не запускается, так как сигнал АЭ от возникающего непровара не превышает заданного уровня срабатывания.

В результате превышения сигнала АЭ заданного порога формирователь суммарной АЭ и числа импульсов АЭ второго канала блока обработки и формирования 11 вырабатывает нормированные по амплитуде прямоугольные импульсы напряжения, которые с выхода формирователя 11 по линии 40 (рис. 1) проходят через устройство задержки I (52) и открытый ключевой каскад 53 (рис. 3) на вход ждущего мультивибратора I (54). В этом случае на выходе мультивибратора I (54) формируется импульс, поступающий на складывающий вход реверсивного счётчика 45. В результате происходит сложение данного сигнала с кодовым значением величины первоначального заданного тока сварки в счетчике 45. На выходе ЦАП 46 устанавливается увеличенное значение сигнала сварочного тока, которое поступает по линии 38 через пульт управления 47 в выпрямитель сварочного тока 48, а увеличенный ток уже подается на сварочную горелку 49 (рис. 1). С выхода реверсивного счетчика 45 кроме ЦАП 46 сигнал поступает на вход дешифратора 55, преобразующего двоично-десятичный код в код работы цифрового индикатора сварочного тока 56. В результате на табло цифрового индикатора 56 будет высвечиваться значение действующей в данный момент времени величины сварочного тока.

Поскольку пороговые устройства 18, 28 и 29 всех трёх каналов обработки и формирования импуль-

сов 10, 11 и 12 включены через эмиттерные повторители 9, 23 и 30 последовательно (рис. 2), то сигнал АЭ от источников зарождающейся горячей трещины в процессе сварки проходит через первый и второй каналы блока обработки и формирования 10 и 11, последовательно запуская пороговые устройства 18 и 28, на вход порогового устройства 29 третьего канала блока обработки и формирования 12, в котором происходит формирование прямоугольных импульсов напряжения из-за превышения сигналом АЭ заданного уровня срабатывания порогового устройства. Поэтому импульсы сигналов АЭ от источников зарождающейся горячей трещины поступают на входы обеих каналов БОС 35 как с выхода второго, так и с выхода третьего каналов блока обработки и формирования 11 и 12 (рис. 1).

Для того, чтобы не запускался первый канал БОС 35 (канал корректировки сварочного тока из-за непровара) сигналом АЭ от источников зарождающейся горячей трещины, импульсы от последних поступают одновременно по линии 40 на устройство задержки I (52) и на вход идущего мультивибратора II (57) по линии 41 (рис. 3), предварительно запирая ключевой каскад 53 для дальнейшего прохождения импульсов с выхода второго канала блока обработки и формирования 11. Поэтому ждущий мультивибратор I (54) не запускается и увеличение сварочного тока не происходит. Далее, импульс с выхода мультивибратора II (57) включает триггер запуска ОКГ 58, сигнал с выхода которого поступает по линии 42 через блок питания 59 на ОКГ 60 (рис. 1). В результате возникает мощный импульс оптического излучения, которое, проходя через поворотное зеркало 65 и объектив 66 оптической системы 61, уничтожает источники зарождающейся горячей трещины в сварном шве 67 свариваемой трубы 36 (рис. 1, 4). Оптическая система 61 перемещается с помощью привода 69, запитанного вместе со сварочной головкой 50 от блока питания и управления 68 сварочной головкой (рис. 1), внутри трубы 36, синхронного с вращением сварочной горелки 49, но с запаздыванием на угол б. При этом оптическая ось системы 61 и трубы 36 совпадают. В данном случае угол б между осями сварочного электрода горелки 49 и лазерного луча ОКГ 60 (рис. 4) зависит от температуры образования горячих трещин для данного материала и радиуса сварного шва 67 трубы 36.

С выхода триггера запуска ОКГ 58 сигнал также поступает через устройство задержки II (62) на устройство сброса в "0" триггера запуска ОКГ 58 и последний с задержкой переходит в нулевое состояние (рис. 3). После сброса триггера 58 в «0» сигнал включения ОКГ 60 снимается. Сигнал включения ОКГ 60 также блокирует ключевой каскад 53 с целью исключения роста величины сварочного тока на время работы ОКГ 60. Устройство первоначального сброса в «0» 64 предназначено для сброса в «0» реверсивного счетчика 45 и триггера запуска ОКГ 58 перед включением всего блока обратной связи 35.

Общий вид изготовленного блока обратной связи 35 представлен на рис. 5.



Рис. 5. *Общий вид блока обратной связи*

3. Обсуждение результатов

Для проверки работоспособности разработанного устройства проводилась автоматическая аргонодуговая сварка неплавящимся электродом стыковых соединений труб без разделки кромок из стали 08Х18Н10Т различных типоразмеров.

В процессе сварки на пониженных значениях импульсного постоянного тока от 10 до 40 А срабатывало пороговое устройство блока обратной связи от сигналов АЭ, свидетельствующих о возникающем непроваре. В результате автоматически увеличивался сварочный ток до 50 А и сварочная головка дополнительно проплавляла зоны непроваров на 2-ом проходе при увеличенном значении тока. Отсутствие непроваров было подтверждено методом рентгенографии и металлографическими исследованиями.

Кроме того, в процессе сварки инициировалось трещинообразование по методике, изложенной в [2, 3]. Методом капиллярной цветной дефектоскопии и рентгенографии констатировалось наличие трещин с раскрытием порядка 0,07...0,1 мм.

С целью проверки эффективности борьбы с трещинами посредством воздействия на них концентрированных потоков когерентного излучения была использована технологическая лазерная установка КВАНТ 12. При генерации оптическим квантовым генератором мощного импульса излучения, сфокусированного в зоне выхода на поверхность сварного шва трещины, в локальной области высоких температур получались тепловые потоки с высокой плотностью энергии. В результате воздействия концентрированных тепловых потоков в данной зоне произошло расплавление металла, устранение дендритов и гомогенизации межкристаллитных прослоек, измельчение зерен, а также генерация импульсных термоупругих полей сжатия, которые послужили своеобразным барьером для источников зарождающихся трещин в тех зонах, где произошло расплавление металла. При этом осуществлялась регистрации сигналов АЭ.

В [10–12] представлено амплитудное распределение сигналов АЭ от воздействии лазерным лучом на металл в зависимости от числа импульсов излучения. Из анализа данного распределении следует, что амплитуда сигналов АЭ от воздействия лазерного излучения соответствует амплитудам импульсов АЭ, характеризующих процессы плавлении и кристаллизации металла при сварке, что гораздо меньше значений амплитуд сигналов от источников зарождающихся трещин и возникающих непроваров.

Таким образом, различие энергетических параметров позволяет беспрепятственно проводить амплитудную селекцию сигналов АЭ от процессов плавления, кристаллизации, воздействия излучении ОКГ и трещинообразования.

Многочисленные металлографические исследования микрошлифов [10–12] полностью подтвердили эффективность применения излучения оптического квантового генератора для борьбы со сформировавшимися трещинами, не говоря уже об источниках зарождающихся трещин.

По результатам опытной апробации разработаны системы активной диагностики процесса, сварки, проведена корректировка технологического режима сварки трубопроводов изделий.

4. Выводы

1. Разработан метод, основанный на приеме и разделении суммарного сигнала АЭ, несущего информацию о дефектах, на сигналы АЭ, характеризующие источники зарождающихся непроваров и трещин. Образовавшиеся в процессе сварки зоны непроваров через систему обратной связи дополнительно проплавляют, а источники уже зарождающейся трещины в процессе сварки уничтожают мощным импульсом излучения оптического квантового генератора.
2. Установлено, что амплитуда сигналов АЭ от процессов, сопровождающих сварку (в том числе и воздействие лазерного излучения на металл), существенно меньше значений амплитуд сигналов АЭ от возникающего непровара и источников зарождающейся трещины.
3. Использование разработанной технологии позволит:
   - оперативно проводить контроль качества сварных швов в процессе сварки в реальном масштабе времени;
   - получать бездефектные сварные соединения в результате автоматической корректировки режима в ходе процесса сварки и устранения источников зарождающейся трещины;
   - использовать метод АЭ как штатный метод неразрушающего контроля сварных соединений;
   - снизить трудоемкость изготовления изделий за счет исключения методов рентгенографии и ультразвукового контроля и операции устранения дефектов;
   - улучшить условия труда за счет устранения вредного влияния рентгеновского излучения на организм обслуживающего персонала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А.с. 1374123 СССР. Способ А.М. Апасова исследования трещинообразования в процессе сварки изделий из однородных металлов / А.М. Апасов. – Бюлл. Изобр., 1988, № 6. – С. 173.
2. Апасов А.М. Анализ разрушения сварных соединений в процессе сварки // Дефектоскопия. – 1996. – № 10. – С. 24–30.
3. Апасов А.М. Разрушение при сварке. – Томск: Изд-во ТПУ, 2002. – 187 с.
4. Apassov A.M. Analysis of failure of welded joints during welding // Nondestructive Testing. Engl. Tr. – 1996. – V. 32. – № 10. – P. 757–762.
5. Апасов А.М., Апасов А.А. Связь дефектов различного структурного уровня с фазовыми переходами при сварке аустенитных сталей // Известия вузов. Физика. – 2000. – Т. 43. – № 11. – С. 15–19.
6. Апасов А.М. Механизм разрушения сварных соединений в процессе сварки // Расплавы. – 2001. – № 3. – С. 18–24.
7. Пат. 2212030 РФ. Способ обнаружения непровара / А.М. Апасов, А.А. Апасов. – Бюлл. Изобр., 2003, № 25. – С. 564.
8. Апасов А.М. Устройство для определения координат дефектов в сварных соединениях по сигналам акустической эмиссии // Сварочное производство. – 1997. – № 11. – С. 54–57.
9. Апасов А.М., Козлов Э.В., Апасов А.А. Анализ структуры сварного шва из стали 08Х18Н10Т // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2001. – № 12. – С. 19–22.
10. Апасов А.М. Исследование процесса устранения трещиноподобных дефектов в стали // Материаловедение. – 1998. – № 3. – С. 54–56.
11. Апасов А.М. Взаимодействие концентрированных потоков лазерного излучения с трещиной в стали // Физика и химия обработки материалов. – 2000. – № 4. – С. 34–38.
12. Апасов А.М. Воздействие концентрированных потоков энергии излучения оптического квантового генератора на дефекты структуры сталей аустенитного класса // Известия вузов. Черная металлургия. – 2000. – № 10. – С. 52–55.
13. Апасов А.М., Апасов А.А. Основы физической теории метода активной диагностики процесса сварки. – Томск: Изд-во ТПУ, 2004. – 248 с.